

PAT-NO: JP411074608A  
DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 11074608 A  
TITLE: QUANTUM DOT CASCADE LASER  
PUBN-DATE: March 16, 1999

## INVENTOR-INFORMATION:

NAME COUNTRY  
NEDD, WINGREEN

## ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME COUNTRY  
NEC CORP N/A

APPL-NO: JP10184786  
APPL-DATE: June 30, 1998

INT-CL (IPC): H01S003/18

## ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain a quantum dot cascade laser in which the working frequency is tunable, the gain spectrum is made narrow strongly, the threshold current is lowered and the humidity dependence is reduced by setting the upper discrete energy level of each quantum dot higher than the lower discrete energy level.

SOLUTION: Active regions 411, 421 are shown, respectively, in the upstream and downstream of a quantum dot 405 and a photon is emitted as shown by a wave arrow 406 when vertical transition takes place from excited high energy state to final state of low energy. More specifically, energy level in each quantum dot 15 regulated such that the vertical transition takes place in the quantum dot 405. When a Bragg reflector is provided, a second quantum dot 455 is not provided but a superlattice Bragg reflector 410 is provided directly under the quantum dot 405 thus obtaining a single dot array structure.

COPYRIGHT: (C)1999, JPO

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-74608

(43) 公開日 平成11年(1999) 3月16日

(51) IntCl.<sup>6</sup>

H01S 3/18

識別記号

F I

H01S 3/18

審査請求 有 請求項の数12 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平10-184786

(22) 出願日 平成10年(1998) 6月30日

(31) 優先権主張番号 08/884967

(32) 優先日 1997年6月30日

(33) 優先権主張国 米国 (U S)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 ネッド ウィングリー

アメリカ合衆国、 ニュージャージー

08540、 プリンストン、 インディペン

デンス ウェイ 4 エヌ・イー・シー・

リサーチ・インスティテューテュ・インク

内

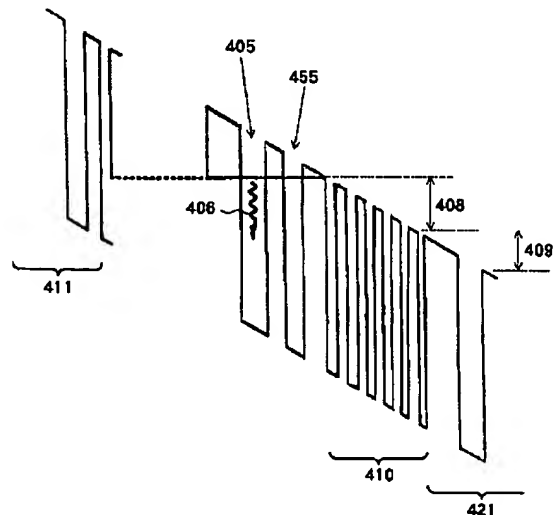
(74) 代理人 弁理士 若林 忠 (外4名)

(54) 【発明の名称】 量子ドットカスケードレーザ装置

(57) 【要約】

【課題】 本発明は、強く狭い利得スペクトル、低しきい値電流動作が可能でその上容易に製造できるレーザ装置を提供することを目的とする。

【解決手段】 量子ドット層各層が、それぞれ障壁領域で空間的に分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の一つの量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにした量子ドット層を有し、電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 (1) 電気的接続を有する基板層と、

(2) 前記基板の上に重ねられた1層以上の量子ドット層であって、この量子ドット層が複数層であるときは各層が層間障壁領域で分離され、またこの量子ドット層各層が、それぞれドット間障壁領域で分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにした量子ドット層と、

(3) 電気的接続を有し前記量子ドット層の上に重ねられるコンタクト層とを有し、その装置を流れる電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項2】 (1) 電気的接続を有する基板層と、

(2) 前記基板の上に重ねられた1層以上の量子ドット層であって、この量子ドット層が複数層であるときは各層が層間障壁領域で分離され、またこの量子ドット層各層が、それぞれドット間障壁領域で分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにしてあり、その際、この量子ドット層内の前記量子ドットの各々は下流側の量子ドットに関連付けられており、その下流の量子ドットは、上流の量子ドットの下位の離散的エネルギー準位よりも十分に低く調整されたエネルギー準位を有し、それにより荷電キャリアが上流の量子ドットの上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移った後、さらに下流の量子ドットの調整された離散的エネルギー準位に移り、フォノンを生じるようにしてある量子ドット層と、

(3) 電気的接続を有し前記量子ドット層の上に重ねられるコンタクト層とを有し、その装置を流れる電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項3】 前記の関連付けられた下流の量子ドットの調整された離散的エネルギー準位が、その下流のドットの基底状態であることを特徴とする請求項2記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項4】 (1) 電気的接続を有する基板層と、

(2) 前記基板の上に重ねられた1層以上の量子ドット層であって、この量子ドット層が複数層であるときは各

層が層間障壁領域で分離され、またこの量子ドット層各層が、それぞれドット間障壁領域で分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにしてあり、

10 その際、この量子ドット層内の前記量子ドットの各々は下位離散的エネルギー準位より低く位置する付加的な離散的エネルギー準位を有し、その量子ドットの付加的な離散的エネルギー準位は、その量子ドットの下位離散的エネルギー準位と付加的な離散的エネルギー準位間フォノン遷移を促進すべく充分調整されており、それにより荷電キャリアがその量子ドットの上位離散的エネルギー準位からその量子ドットの下位離散的エネルギー準位に移った後、さらにその量子ドットの調整された付加的な離散的エネルギー準位に移り、フォノンを生じるようにしてある量子ドット層と、

(3) 電気的接続を有し前記量子ドット層の上に重ねられるコンタクト層とを有し、その装置を流れる電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項5】 前記の量子ドットの調整された付加的な離散的エネルギー準位が、そのドットの基底状態であることを特徴とする請求項4記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項6】 前記層間障壁領域がブラッグ反射器であることを特徴とする請求項1～5のいずれかに記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項7】 前記量子ドット層の各層の直ぐ下流にブラッグ反射器を有し、量子ドット層が複数層であるときは、このブラッグ反射器が前記層間障壁領域を兼ねることを特徴とする請求項1～5のいずれかに記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項8】 前記量子ドット層は、積層されていない単一のドットからなる多数の量子ドットが、ドット間障壁領域で分離された単一量子ドットアレイ構造を備え、この量子ドット層の直ぐ下流にはブラッグ反射器が設けられており、量子ドット層が複数層であるときは、このブラッグ反射器が前記層間障壁領域を兼ねることを特徴とする請求項1、4または5記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項9】 前記量子ドット層と前記基板層間に挟まれた第一クラッド層と、

前記量子ドット層と前記コンタクト層間に挟まれた第二クラッド層とをさらに有することを特徴とする請求項1～8のいずれかに記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項10】 前記量子ドットがGaAsで形成されていることを特徴とする請求項1～9のいずれかに記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項11】 前記量子ドットが、B、Al、Ga、In、およびTlから成るIII族とN、P、As、Sb、およびBiから成るV族によるIII-V族化合物で形成されていることを特徴とする請求項1～9のいずれかに記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【請求項12】 前記量子ドットが、Zn、Cd、およびHgから成るII族とO、S、Se、Te、およびPoから成るVI族によるII-VI族化合物で形成されていることを特徴とする請求項1～11のいずれかに記載の量子ドットカスケードレーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体レーザ装置の分野、特に、従来の半導体カスケードレーザ装置に伴うフォノン減衰を排除し、かつ製造が容易な量子ドットカスケードレーザ装置に関する。

【0002】

【従来の技術】「サイエンス (Science)」第264巻、第553～556頁 (1994年4月22日) に記載のJ. Faist等による「量子カスケードレーザ」と題する論文が開示するように、最近の技術進歩により、結合量子井戸のカスケードから成る半導体レーザの実現が可能になった。

【0003】さらに最近になって、前述の量子井戸レーザ装置の実施形態は、Capasso等に1995年10月10日付で発行された米国特許第5,457,709号「ユニポーラ半導体レーザ」、および1996年4月16日付発行の米国特許第5,509,025号「ユニポーラ半導体レーザ」の中に記載されている。

【0004】図1は、量子井戸レーザの簡略化した伝導帯のエネルギーダイアグラムで、下のサブバンドへ放射遷移する電子を示している。この図が示すように、結合井戸の第一励起状態のエネルギー $\epsilon_1$ から基底状態のエネルギー $\epsilon_0$ への電子の遷移により、光子が発生する。

【0005】量子井戸デバイスの重要な特徴は、図1に示した励起状態および基底状態が離散的な準位ではなくバンドを形成することである。これは、伝導帯エネルギーの変化の方向、即ち電流方向を横断する二次元平面において電子の運動が自由であることに依る。ここでの問題点は、量子井戸レーザ中の電子失活機構では、光子ではなく光学フォノンを放出する無放射が支配することである。バンドはエネルギーにおいて連続的なので、このような遷移は常に許容される。電子-光学フォノン結合は電子-光子結合よりはるかに強いので、量子井戸レーザでは、無放射フォノン遷移が、放射的な光子遷移をほぼ3000対1と大きく上回る。

【0006】この無放射フォノン遷移のために量子井戸

カスケードレーザは極めて非効率であり、有用なレーザ発振を起こすには高しき値電流を要する。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】さらにまた、本出願の出願者により1996年3月29日に出願された米国特許出願第08/625,029号 (特開平10-12968号公報) では、上記量子井戸デバイスの幾多の利点を保持しつつ、なおかつ、その幾多の周知の問題点を解決する量子ドットカスケードレーザが説明されている。このような量子ドット装置の商業的および科学的価値を鑑みると、この量子ドットデバイスの改善は少なからぬ関心を引く課題である。

【0008】本発明は、従来の量子井戸カスケードレーザの問題点を解決し、同調可能な動作周波数、本質的に強く狭い利得スペクトル、低しき値電流、湿度依存性の低い動作を示し、その上容易に製造できる量子ドットカスケードレーザ装置を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は、(1)電気的接続を有する基板層と、(2)前記基板の上に重ねられた1層以上の量子ドット層であって、この量子ドット層が複数層であるときは各層が層間障壁領域で分離され、またこの量子ドット層各層が、それぞれドット間障壁領域で分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにした量子ドット層と、(3)電気的接続を有し前記量子ドット層の上に重ねられるコンタクト層とを有し、その装置 (即ち、この発明の量子ドットカスケードレーザ装置) を流れる電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置に関する。

【0010】また本発明は、(1)電気的接続を有する基板層と、(2)前記基板の上に重ねられた1層以上の量子ドット層であって、この量子ドット層が複数層であるときは各層が層間障壁領域で分離され、またこの量子ドット層各層が、それぞれドット間障壁領域で分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにしてあり、その際、この量子ドット層内の前記量子ドットの各々は下流側の量子ドットに関連付けられており、そ

の下流の量子ドットは、上流の量子ドットの下位の離散的エネルギー準位よりも充分に低く調整されたエネルギー準位を有し、それにより荷電キャリアが上流の量子ドットの上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移った後、さらに下流の量子ドットの調整された離散的エネルギー準位に移り、フォノンを生じるようにしてある量子ドット層と、(3)電気的接続を有し前記量子ドット層の上に重ねられるコンタクト層とを有し、その装置(即ち、この発明の量子ドットカスケードレーザ装置)を流れる電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置に関する。

【0011】ここで、前記の関連付けられた下流の量子ドットの調整された離散的エネルギー準位は、その下流のドットの基底状態であることが好ましい。

【0012】さらに本発明は、(1)電気的接続を有する基板層と、(2)前記基板の上に重ねられた1層以上の量子ドット層であって、この量子ドット層が複数層あるときは各層が層間障壁領域で分離され、またこの量子ドット層各層が、それぞれドット間障壁領域で分離された量子ドットのアレイを備えていて、各ドットは所定の体積、および上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有し、前記上位離散的エネルギー準位は前記下位離散的エネルギー準位より高く、それにより量子ドットアレイ内の量子ドット内で荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、そのドット内で垂直放射遷移が起こるようにしてあり、その際、この量子ドット層内の前記量子ドットの各々は下位離散的エネルギー準位より低く位置する付加的な離散的エネルギー準位を有し、その量子ドットの付加的な離散的エネルギー準位は、その量子ドットの下位離散的エネルギー準位と付加的な離散的エネルギー準位間フォノン遷移を促進すべく充分調整されており、それにより荷電キャリアがその量子ドットの上位離散的エネルギー準位からその量子ドットの下位離散的エネルギー準位に移った後、さらにその量子ドットの調整された付加的な離散的エネルギー準位に移り、フォノンを生じるようにしてある量子ドット層と、(3)電気的接続を有し前記量子ドット層の上に重ねられるコンタクト層とを有し、その装置(即ち、この発明の量子ドットカスケードレーザ装置)を流れる電流の通過により、量子ドット内での垂直放射遷移に起因するレーザ動作を起こす量子ドットカスケードレーザ装置に関する。

【0013】本発明では、上記のように量子ドットの各々が上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有しており、荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に移る際、その単一のドット内で垂直放射遷移が起こるように構成される。

【0014】このため、本発明の量子ドットカスケード

レーザ装置は量子井戸レーザの望ましい特徴は保持しながら、なおかつ、問題点である無放射フォノン減衰は排除するものである。

【0015】本発明では、量子ドットアレイを具えた量子ドット層が複数層あるときは、それらは互いに層間障壁領域で分離され、この層間障壁領域の存在により量子ドット内の励起状態の電子がトンネルで下流に逃散することを防止する。

【0016】好ましい実施形態においては、層間障壁領域として超格子ブラッグ反射器を用いることにより単一ドット内での垂直遷移を効果的に行わせることができる。このようなレーザは、単一の量子ドットのみを使用し効果的に構築することができる。従って、本発明による量子ドットカスケードレーザ装置は、同調可能な動作周波数、本質的に強く狭い利得スペクトル、低しきい値電流、湿度依存性の低い動作を示し、その上容易に製造できる。

【0017】

【発明の実施の形態】本発明の主題である量子ドットカスケードレーザ装置を正当に評価するには、従来の技術の量子井戸レーザとの比較が有益である。尚、以下の説明においては、電子的に結合した量子ドットの対の間で電子遷移が起こる場合を例に説明するが、本発明では、単一の量子ドットが、上位離散的エネルギー準位と下位離散的エネルギー準位を有しており、荷電キャリアが上位離散的エネルギー準位から下位離散的エネルギー準位に垂直に遷移するものであって、その原理的には同じである。図1についてさらに説明する。同図は電子的に結合した二つのドット、あるいは電子的に結合した二つの井戸を示す。結合ドット、あるいは結合井戸の第一励起状態から基底状態への電子の遷移により光子が発生する。いずれの場合においても、上流の障壁をトンネルする電流により電子は励起状態に直接注入される。一度電子が失活すれば、その電子は下流の障壁を通して直ちに外部に出るので、光子吸収は無視できる。

【0018】量子ドットレーザと従来の量子井戸レーザの重要な相違点は、量子ドットレーザでは図1に示すように、励起および基底電子準位が真に離散的であるのに対し、量子井戸レーザでは図1上の励起および基底電子準位はその状態の連続的なバンドの底に相当するということである。特に、量子井戸レーザでは、図1で示される伝導帯エネルギーの変化の方向(すなわち電流方向)を横断する二次元方向において電子の運動が自由であることにより、電子がバンドを形成する。このため、量子井戸内の電子失活機構では、光子ではなく、光学フォノンの放出を含む無放射が支配的である。バンドはエネルギーにおいて連続的なので、このような遷移は常に許容される。また、電子-光学フォノン結合は電子-光学結合よりはるかに強いのでこのような無放射遷移が放射遷移を常に支配する。

【0019】これとは対照的に、量子ドットレーザでは放射失活のレートが無放射失活のレートを支配する。結合ドットの励起および基底状態は離散的な単位であるから、無放射失活はエネルギー差 $\epsilon_1 - \epsilon_0$ でのフォノン放出を含む。一般に、フォノンエネルギーは連続のバンドを形成するので、このような単一フォノン失活は許容される。しかし、エネルギー差 $\epsilon_1 - \epsilon_0$ がフォノンエネルギーの最大値より大きい場合には(例えば光学フォノンエネルギーはGaAsで $\hbar\omega_{LO} = 36\text{ meV}$ )、単一のフォノンでは電子エネルギーを搬送できない。

【0020】尚、本明細書中で、表記の都合上、テキスト文章中ではプランク定数

【0021】

【数1】

$\hbar$

を、 $\hbar^*$ と表記するものとする。

【0022】さて、この場合、複数のフォノンによる失活過程はなお許容はされるがこのレートは僅小で無視できる(ある種の狭いエネルギーバンドの場合を除く)。従って量子ドットでの支配的な失活機構は光子放出である。

【0023】結合ドットの各々のサイズは、励起および基底状態間のエネルギー差が光学フォノンエネルギー $\hbar\omega_{LO}$ を超過するという条件に強く限定される。その結果、ドットの最大サイズ $L$ はサイズ $L$ の正方形の井戸のエネルギー間隔から、(1)式によって求められる。

【0024】

【数2】

$$\frac{3\pi^2\hbar^2}{2m^*L^2} > \hbar\omega_{LO} \quad (1)$$

GaAsの場合、有効質量 $m^* = 0.067m$ であるから、ドットは縦、横、高さ全三方向とも、 $L$ は約20 nm未満でなければならない。

【0025】図2に、レーザを構成するのに適したダブル量子ドットアレイの基本構造(サンドイッチ)を示す。図中の導電板60は、ダブル量子ドットアレイに構造的支持台を提供すると同時に、量子ドットのサンドイッチからその上下に積み重ねられている他のサンドイッチへの導電路を提供している。実施形態においては、導電板はn型にドーピングしたGaAsで作製されているが、GaAsの代りにIII-V族元素あるいはII-VI族元素からつくられた他の物質を使用することもできる。

【0026】導電板の間には、効率のよいレーザ発振に適すドット密度で、一定間隔に並ぶ量子ドットのアレイが設けられる。図2で示すように、量子ドット62はドット間障壁領域64によって完全に空間的に分離され、かつその間にサンドイッチ状に挟まれることが望ましい。図2では明示されていないが、障壁物質は各ダブル

ドットの両面、すなわち上面と下面、および近隣ドット間の空隙全てから取り囲む。当業者は量子ドット62は例えば、GaAs;あるいはB、Al、Ga、In、およびTlから成るIII族とN、P、As、Sb、およびBiから成るV族によるIII-V族化合物;Zn、Cd、およびHgから成るII族とO、S、Se、Te、およびPoから成るVI族によるII-VI族化合物で形成することができる。障壁層においても同様で、例えばAlGaAsのような適当な障壁材料から作製できる。

【0027】レーザ発振は、利得係数 $\gamma(\omega)$ が分配損失を上回る場合にのみ可能である。

【0028】

【数3】

$$\gamma(\omega) > \alpha_I + \alpha_M \quad (2)$$

ここに、 $\alpha_I$ はバルク損失、 $\alpha_M = (1/L) \log(1/R)$ はミラー損失である。式(2)はドット対の最小密度とドットサイズのばらつきを同時に制限する。利得は結合ドットの三次元密度 $N$ に比例し、式(3)によって与えられる。

【0029】

【数4】

$$\gamma(\omega) = fNo(\omega) \quad (3)$$

ここで $f$ は電子が励起状態に存在する結合ドットの割合であり(電子が基底状態に存在するドットの僅小な割合は無視する)、 $\sigma(\omega)$ は振動子強度 $S$ と規格化されたスペクトル線形関数 $g(\omega)$ の積である(式(4))。

【0030】

【数5】

$$\sigma(\omega) = Sg(\omega) \quad (4)$$

双極子近似を使うと、振動子強度は、式(5)

【0031】

【数6】

$$S = \frac{4\pi^2\alpha\omega_{fi}}{n} \left| \langle f | r \cdot \hat{e}_i | i \rangle \right|^2 \\ = \frac{4\pi^2\alpha\omega_{fi}}{n} \left( \frac{td}{\hbar\omega_{fi}} \right)^2 \quad (5)$$

で表わされる。 $\alpha = e^2/\hbar^*c \approx 1/137$ は微細構造定数、 $n$ は屈折率、 $\omega_{fi}$ は始状態と終状態の間の遷移振動数である。始状態と終状態の双極子行列要素

【0032】

【数7】

$$\langle f | r \cdot \hat{e}_i | i \rangle$$

は双極子モーメントの分極方向

【0033】

【数8】

 $\hat{e}$ 

に射影される。結合ドットでは、遷移双極子モーメントはまさに電流方向に沿って存在するので、放射もその方向に分極される。式(5)の二行めでは、双極子行列要素がドット間の距離 $d$ とドット間混成度 $t/h^* \omega_{fi}$ の積で近似されている。ただしここで $t$ はドット間のトンネル結合である。以上の説明で残った因子は規格化された関数 $g(\omega)$ である。無秩序による不均一な広がりがあるスペクトル線形を決定すると仮定する。さてここで、便宜上、半値幅(FWHM)が $\Delta\omega$ の無秩序広がりを持つ、ローレンツ型関数形を考えると、ピーク利得係数は【0034】

【数9】

$$\gamma_{\text{peak}} = \frac{2fNS}{\pi\Delta\omega} \quad (6)$$

となる。

【0035】ピーク利得と分配損失が等しいと置くことにより、量子ドットレーザの密度と均一性(ばらつき)の双方に関する制限条件が求められる。SalehおよびTeich著の「フォトリソの基礎(Fundamentals of Photonics)」(Wiley刊、ニューヨーク、1991年)に記載されているように、半導体注入型レーザの分配損失は少なくとも $10\text{ cm}^{-1}$ はある。ドット間混成度 $t/h^* \omega_{fi}$ は十分に小さいので、励起状態から下流の障壁を通して漏出するレートを自然放出レート $\omega_{sp}$ が支配する。自然放出レート自体は、基底状態からの逃散レートより、はるかに小さくなければならない。下流の障壁を通して逃散するレートを $\Gamma$ と置くと、この大小関係は、式(7)

【0036】

【数10】

$$(t/h\omega_f)^2 \Gamma < \omega_{sp} < \Gamma \quad (7)$$

で表わされ、混成度は明らかに $(t/h^* \omega_{fi})^2 < 1/10$ に抑えられる。また、遷移エネルギーを $100\text{ meV}$ 、ドット間の距離 $d=10\text{ nm}$ 、屈折率 $n=3$ とすると、レーザ発振の条件は、広がりエネルギーに対する励起した結合ドット密度の比として、式(8)

【0037】

【数11】

$$\frac{fN}{h\Delta\omega} = 1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1} \quad (8)$$

となる。

【0038】従って、遷移エネルギーが10%の無秩序広がり(5%のばらつき)を示していて、励起した割合がほぼ $f=1$ のとき、結合ドット対の最小密度を求めると、体積 $(180\text{ nm})^3$ 当たり一対となる。

【0039】この結合ドットの平均密度をレーザモード

下の領域中で達成するには、三次元構造が必要となる。その好ましい構造の一例は、図3に示されるような、結合量子ドットの二次元アレイ(図2参照)の積み重ねから成り、全体を通じ利得条件を満たす密度をもつような重層構造である。

【0040】以上により、このような量子ドット装置のしきい値電流を求めることが可能である。放射失活が支配するので、ドット各対を通して流れる電流は、自然放出による損失を補充すれば、それで充分である。全自然放出レートは、式(9)

【0041】

【数12】

$$\omega_{sp} = \frac{4\pi n \omega_f}{3c^2} \left\langle |f|r_i \right\rangle^2 \quad (9)$$

$$= \frac{4\pi n \omega_f}{3} \left( \frac{td}{\hbar c} \right)^2$$

で表わされる。

【0042】同じパラメータを用い、結合ドット対当たりのしきい値電流 $J_t = e \omega_{sp} = 1.6\text{ pA}$ が求められる。三次元での均一なドットアレイでは、これは、 $4.9\text{ mA/cm}^2$ の電流密度となる。量子ドット装置のこのしきい値電流密度は、量子井戸カスケードレーザに必要な $14\text{ kA/cm}^2$ より、桁数で、6.5桁低いものである。

【0043】図3に、本発明のここまでの教示によって構築された量子ドットレーザの実施の形態を示す。まず、基板702はレーザの構造的支持台を提供する。基板は、典型的には単結晶ウェハが用いられ、その上に、さらに転位や欠陥のない高純度の単結晶性を保持しつつ、レーザ作動に必要な種々の機能層を成長させるに適した格子パラメータを有するものとする。

【0044】基板702の上には、クラッド層704が重ねられる。このクラッド層704は、図2で示したように構築されたダブルドットアレイ層714内部で発生する光子を、適切に反射する。

【0045】このようなダブルドットアレイ層714は三層のみ図示されているが、この層の使用材料により、効果的なダブルドット密度を得る層の数が異なることは、当業者は容易に了解されるだろう。

【0046】さらにまた、クラッド層704の向かい合う端部が、発振された放射光に対して高い反射度を有することが望ましいが、この両端712aと712bの内少なくとも一端は、レーザ光が射出するためには、部分的には透過可能でなければならない。

【0047】また、レーザ発振を維持するに充分な電流を全構造に供給するため、基板702およびコンタクト層706には、電気的コンタクト708と710をそれぞれ備えることが望ましい。

11

【0048】さらにまた、下流において障壁を付加すれば、励起状態からのトンネルによる逃散を遮断し、量子ドットカスケードレーザの全体の効率を高めるという効果があることは、当業者には明らかであろう。

【0049】各層の寸法はレーザ設計の周知の原則によって決定される。

【0050】前述の各構造の製作方法としては、分子線エビタキシー(MBE)や化学気相析出法(CVD)など種々な周知の技術方法が可能である。

【0051】ここまで述べられてきた、量子ドットに関し設けられた条件は、全て、トンネルを介しての励起状態からの漏れを防ぐためである。

【0052】従って、以上の説明では、結合ドット対を有する量子ドット層におけるレーザ発振について説明してきたが、例えば、励起状態エネルギーに禁止帯を有する超格子の設置など、いわゆる「バンド構造エンジニアリング」を初めとする他の手段を用いこのトンネルを防止できるならば、本発明は、単一のドット内でのレーザ発振の遷移が起こる、つまり単一の「垂直遷移」が起こるレーザという実施形態を取ることができる。

【0053】即ち、本発明では、励起状態から下流側に直接トンネルによって漏れるのを防ぐような構造であって、単一量子ドット内で垂直遷移が起こるようになっていれば、量子ドット層が単一量子ドットアレイで構成されていても、ダブルドットアレイで構成されていてもどちらであってもよい。

【0054】ダブルドットアレイで構成される場合の量子ドット層の構造は、図2に示した構造と同様であって、ドット間障壁領域64により2つの積層された量子ドット62が分離されていると同時に、量子ドットの上面、下面、および図示されていない、量子ドットアレイの面方向の空間もドット間障壁領域64により覆われ、分離されている。

【0055】また、量子ドット層が、単一量子ドットアレイで構成される場合は、図2で示した構造とは異なり垂直方向には1個だけの量子ドット62が、平面的(層の面内方向)に多数個が配列され、各量子ドットの上下の面、および平面方向の空間がドット間障壁領域64によって覆われ、分離されている。

【0056】本発明において、量子ドット層が単一量子ドットアレイで構成される場合は、その直ぐ下流側に励起状態からの電子のトンネルを防止する層が必須であり、これは、ブラッグ反射器を用いることにより達成することができる。

【0057】一方、量子ドット層がダブルドットアレイで構成される場合に、その直ぐ下流側にブラッグ反射器を設けることは、必須ではない。しかし、励起状態からの電子のトンネルを効果的に防止するためには、ブラッグ反射器を設けることが好ましい。

【0058】さて、図4は、本発明による、その量子

12

ドット垂直遷移レーザの伝導帯ダイアグラムの一部である。ここで、禁止ミニバンド408と許容ミニバンド409は超格子ブラッグ反射器410が寄与するもので、それぞれ、超格子が電子に対して比較的透過性があるエネルギー領域と比較的不透明なエネルギー領域を示す。上流の活性領域411と下流の活性領域421はそれぞれ量子ドット405の上流と下流に示され、励起された高エネルギー状態から低エネルギーの終状態に垂直遷移が起こるとき、波型矢印406で示されるように光子が放出される。

【0059】当業者は容易に了解されるであろうが、この幾何学的構造では、量子ドットの励起状態エネルギーの許容終状態は、量子ドットから直ぐ下流の領域に存在しない。励起された電子はトンネルで逃散できない以上、一見望むらくは量子ドットの低エネルギー状態に光子放出をすることにより一失活するのみである。この図は、符号405と符号455で示したダブルドット構造で示してあるが、量子ドット405内で垂直遷移が起こるように各量子ドット内のエネルギーレベルが調整されて構成されているものである。そして、この図のようにブラッグ反射器が設けられているときは、第二の量子ドット455を設けずに、量子ドット405の直ぐ下流に超格子ブラッグ反射器を設けることにより、単一ドットアレイ構造とすることができる。

【0060】本発明のカスケードレーザ装置において、量子ドットのアレイを備えた量子ドット層は、1層であっても複数層であっても良い。図4の例では、上流の活性層411、下流の活性層421もそれぞれ量子ドット層で構成されることができる。

【0061】本発明のカスケードレーザが、複数の量子ドット層で構成される場合は、各量子ドット層は層間障壁領域で分離される。この層間障壁領域は、ブラッグ反射器で構成することができる。即ち、量子ドット層の直ぐ下流にブラッグ反射器を設けることで、電子のトンネルを効果的に防止することができる。量子ドット層が単一量子ドットアレイ構造である場合は、前述のように、直ぐ下流にブラッグ反射器を設けることが必須である。従って、最も下流側の活性層においても、その活性層が単一量子ドットアレイ構造からなる量子ドット層であるときは、その下流側にもブラッグ反射器を設けることが必要である。

【0062】さらに、前記垂直遷移量子ドットレーザは、本来のフォノン放出を利用した更なる改善が可能である。さて図5は、図4の垂直遷移量子ドットエネルギー遷移ダイアグラムで、上流側の量子ドット405の下位レーザ発振準位からフォノン放出が起こるような量子ドット419を付加したものである。ここで、光子放出遷移406は新しく付加された量子ドット419へのフォノン放出407を媒介として、さらに強化される。下位のレーザ発振準位より充分に低く同調されたエネルギー



13

一準位を有するこの第二のドットを包含することにより、この下位のレーザ発振準位からの密度減少がより迅速に行なわれるからである。尚、この構成においては、ダブルドットアレイ構造が必須であるが、光子放出遷移は、ドット間では生じないようにエネルギーレベル等が調整されている。

【0063】最後に、図4および図5に示された原則は、三つのエネルギー準位を有する単一のドット構造に集約可能であることを当業者は直ちに了解されるだろう。さて図6は、図4および図5で述べられた原則を統合して構築した装置の伝導帯ダイアグラムである。単一量子ドット405内で垂直遷移を示すこの伝導帯ダイアグラムが示すように、準位3(413)から準位2(415)への電子の遷移の際、光子が放出される。共鳴フォノン放出は準位2(415)から準位1(417)で起こる。ここで準位2と準位1のエネルギー差を利用して、このフォノン遷移が容易に起こるような設計が可能である。準位1は量子ドットの基底状態であることが望ましい。この形態においても単一の量子ドット内でこのような作用が起こるように構成されている限り、量子ドット層は、単一量子ドットアレイであっても、ダブルドットアレイであってもよい。

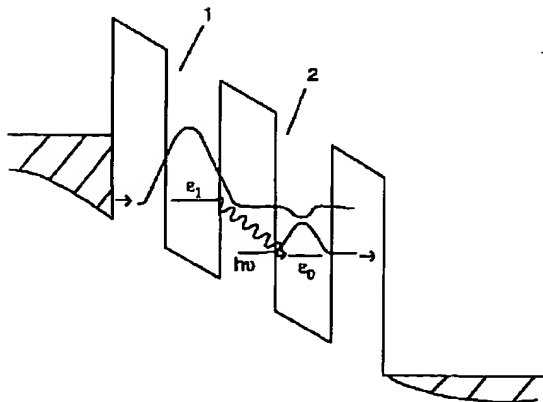
【0064】以上、量子ドットカスケードレーザが図示され説明されたが、特許請求の範囲により限定される本発明の基本と精神に反することなく変更や修正が遂行できることは当業者には明らかであろう。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】従来のカスケードの伝導帯エネルギーダイアグラムで、低いサブバンドに放射遷移している電子を示す。

【図2】導電板間に挟まれた結合ドット対のアレイの略図である。

【図1】



14

【図3】図2のアレイサンドイッチから構成された量子ドットカスケードレーザ装置の断面図である。

【図4】伝導帯エネルギーダイアグラムで超格子内の垂直遷移を示す。

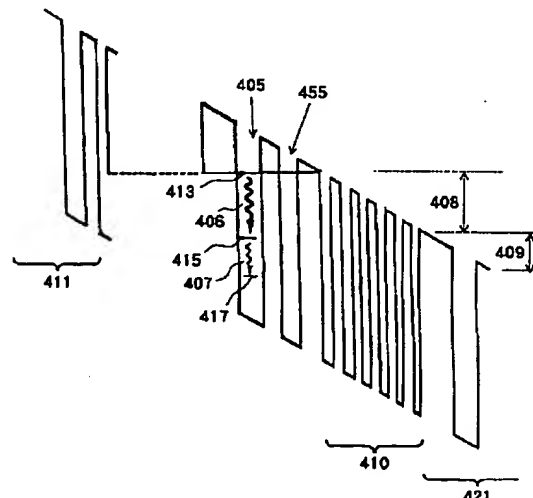
【図5】伝導帯エネルギーダイアグラムで、本発明の第二の実施形態における超格子内の垂直遷移を示す。

【図6】伝導帯エネルギーダイアグラムで、本発明の第三の実施形態における超格子内の垂直遷移を示す。

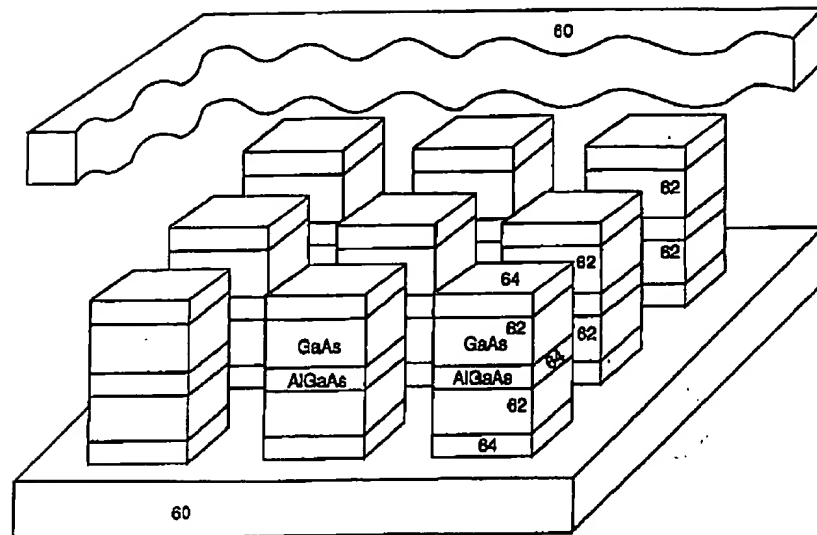
#### 【符号の説明】

10	60	導電板
	62	量子ドット
	64	ドット間障壁領域
	702	基板
	704	導波路クラッド層
	706	コンタクト層
	708	電氣的コンタクト
	710	電氣的コンタクト
	712a	クラッド層端部
	712b	クラッド層端部
20	714	ダブルドットアレイ層
	405	量子ドット
	406	波型矢印で示される光子放射遷移
	407	フォノン放出
	408	禁止ミニバンド
	409	許容ミニバンド
	410	超格子ブラッグ反射器
	411	上流の活性領域
	413	量子ドット405の準位3
	415	量子ドット405の準位2
30	417	量子ドット405の準位1
	419	量子ドット
	421	下流の活性領域

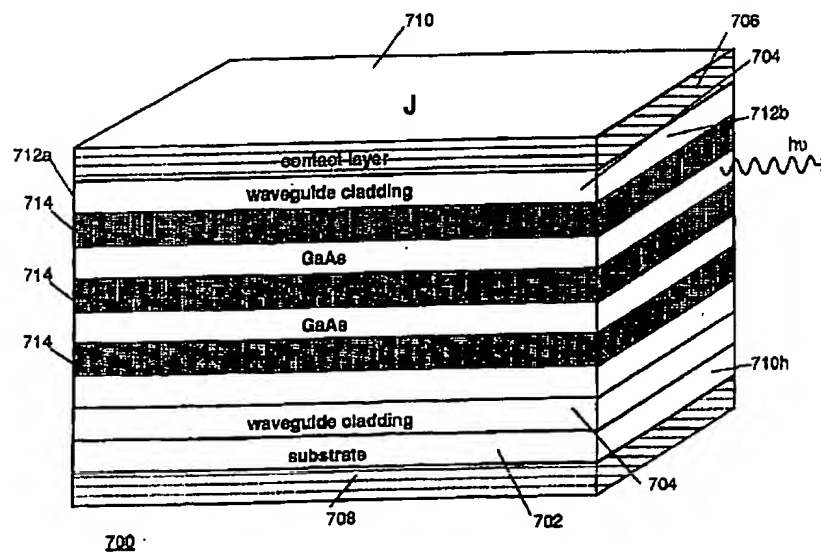
【図6】



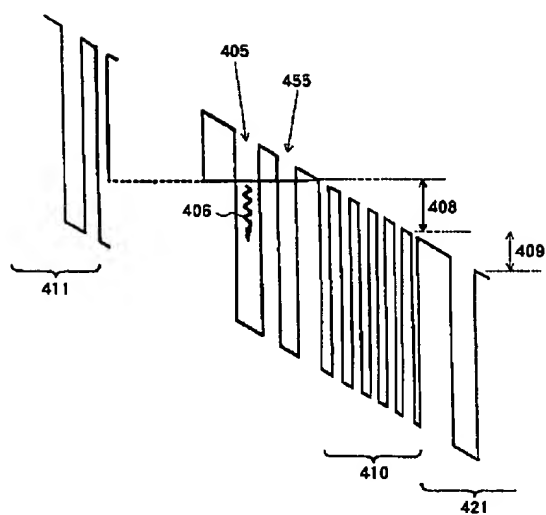
【図2】



【図3】



【図4】



【図5】

